

深海底に設置された単一のハイドロフォンによる 音源の位置推定に関する考察 —相模湾初島沖音響観測データに基づく—

岩瀬 良一[†]

[†] 国立研究開発法人海洋研究開発機構 〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25
E-mail: [†] iwaser@jamstec.go.jp

あらまし 相模湾初島沖「深海底総合観測ステーション」において、1993 年の設置以来蓄積された単一ハイドロフォンによる水中音響観測データに記録されていた水中の位置が既知の人工音源である無人探査機「ドルフィン 3K」が発するパルス信号の観測波形を用い、単一ハイドロフォンによる音源の位置（深度及び水平距離）の推定方法とその有効性を検討した。

キーワード 単一ハイドロフォン、音源定位、人工音源、深海域、マッコウクジラ鳴音

A study on the estimate of the sound source location by the single hydrophone deployed on deep seafloor

—Based on the observation data of the underwater sound offshore of Hatsushima Island in
Sagami Bay—

Ryoichi IWASE[†]

[†] Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) 3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku,
Yokohama, Kanagawa, 236-0001 Japan
E-mail: [†] iwaser@jamstec.go.jp

Abstract By using pulse signals emitted from remotely operated vehicle “Dolphin3K”, which is one of the artificial sound sources observed with a single hydrophone of the multidisciplinary deep seafloor cabled observatory offshore of Hatsushima Island in Sagami Bay, the methodology and its validity on the estimation of depth and range of the sound source location with a single hydrophone were studied.

Keywords Single hydrophone, Localization of sound source, Artificial sound, Deep sea, Sperm whale vocalization

1. はじめに

静岡県熱海市の沖合約 11km の相模湾に位置する初島の南東沖の深海底では、海底ケーブル型観測システムである相模湾初島沖「深海底総合観測ステーション」（以下、「初島沖ステーション」）により、ビデオカメラ、ハイドロフォン、地震計、CTD（Conductivity, Temperature, depth: 海水の電気伝導度、水温、深度）センサなどの多種類のセンサを用いた深海環境の総合観測が、1993 年 9 月の設置[1]以来、2000 年の水中部を含む全システムの更新[2]を挟んで現在に至るまで、20 年以上の長期にわたって実施されている。これらのセンサで取得されたデータは、海底ケーブルを介してリアルタイムで初島の陸上局に伝送される。このうちハイドロフォンにより得られた水中音響信号は、陸上局において音声信号として出力されているアナログ信号

を、ビデオカメラによる海底観察の際、映像の録画とともに S-VHS もしくは DVCAM ビデオテープの音声トラックに録音している[3, 4]。7 千本以上に及ぶこれらのビデオテープが最近すべてデジタル化され、その音響観測データの解析を通じて、マッコウクジラの鳴音が季節に関係なくほぼ通年検出されていることが明らかとなった[5]。マッコウクジラの生態を把握するためには、その移動状況等は重要な情報である。しかしながら、初島沖ステーションには単一のハイドロフォンしか搭載されていないため、通常行われる複数のハイドロフォンの到達時間差を用いた鳴音の音源定位手法が適用できない。初島沖ステーションで検出された鳴音の中には、海面反射波を伴ったものがあり、直達波との到達時間差の時間変化から、鉛直方向の移動が推定される場合がある[6]。しかしながら、これだけでは

水平距離が不明なため、推定される深度には不確定性がある。一方、デジタル化された音響観測データの中に、海中の位置が既知の人工音源が含まれていることが判明した。そこで、この人工音源を含む音響観測データを用いて、単一のハイドロフォンを用いた音源の位置推定の可能性を検討した。

2. システム構成と音響観測データ

初島沖ステーションは、初島南東沖の水深 1175 m の海底に設置されており、初島陸上局とは海底ケーブル（光電気複合ケーブル）で接続され、水中部への連続給電並びに陸上局へのリアルタイムデータ伝送が行われている(図 1)。ハイドロフォンの検出部は ITC-1010A で、これにより取得された水中音響信号は、陸上局でアナログ信号として出力される。この信号を 2000 年のシステム更新以前は、S-VHS ビデオテープ、それ以降は DVCAM または S-VHS ビデオテープの音声トラックに収録している。収録タイミングは、基本的にはビデオカメラによる海底映像を収録する時となっている。通常は毎日 0 時及び 12 時の 2 回、1 日あたり合計 30 分間（1999 年以前）または 26 分間（2000 年以降）の間欠自動録画であり、これに加えて週 1 回の頻度で原則 6 時間以上の連続手動録画が実施されてきた。ただし、近年はビデオカメラの不調などに伴い、収録タイミングが変更されている。1999 年以前の初島沖ステーション水中部へ給電方式は交流給電であるが、これに起因すると考えられる 50Hz 及びその高調波に相当する周波数を有するハムノイズ、及びデジタル回路に起因すると考えられる約 0.7 秒間隔の周期的なパルスノイズが音響信号に常時重畳している。2000 年以降は給電方式を直流給電に変更し、こうしたハムノイズ及び周期的なパルスノイズは無くなった。しかしながら、2005 年 6 月以降、回路の経年劣化に起因すると推定される不規則かつバースト的な電気ノイズが音響信号に混入している。全観測期間を通じて、S-VHS テープに収録された音響信号については、調整を試みても聴取困難なほど大きなトラッキングノイズが一部に存在する。またシステム更新前後で音響データの収録周波数帯域に差があり、10 kHz 程度以上の周波数帯域の信号は、1999 年以前のデータにのみ検出される特徴が認められる[5]。

音響信号のデジタル化に際し、S-VHS テープに録音されたものについては、映像信号とともに音響信号をサンプリング周波数 48 kHz の PCM 形式とする MPEG-2 形式に変換した後、音響観測データを WAV 形式で抽出した。DVCAM テープに収録された音響信号は、サンプリング周波数 32 kHz または 48 kHz の PCM 形式であり、そのまま PCM 形式で抽出可能な AVI 形

式に変換した後、音響観測データを WAV 形式で抽出した。

なお、2000 年以降はこれに加え、サンプリング周波数 200 Hz の連続データとしても音響観測データが収録されている。

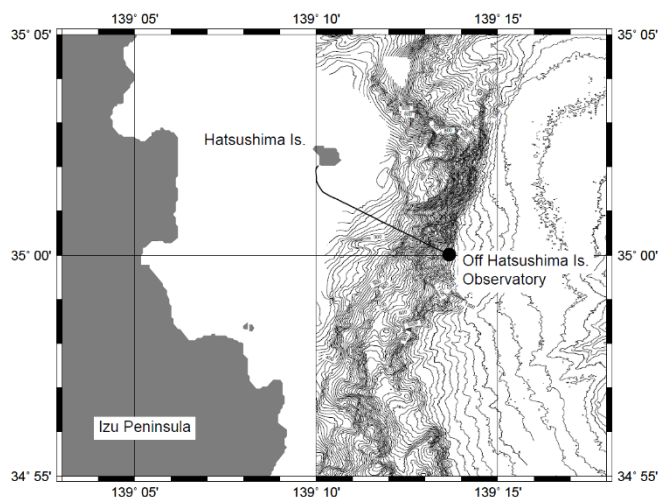


図 1 初島沖ステーションの設置位置と海底ケーブルルート

Fig.1 Location of “Off Hatsushima Is. Observatory” and submarine cable route

3. 音源の位置推定方法の検討

受動的音響観測における音源定位方法は、文献[7]などにまとめられているように、複数のハイドロフォンを用いて、各ハイドロフォンへの音波の到達時間差に基づいて音源位置を推定することが一般的である。しかしながら、初島沖ステーションには単一のハイドロフォンしか搭載されていないため、この手法は適用できない。

単一ハイドロフォンによる音源定位手法としては、モード分散を用いたものがある[8, 9]。しかしながらこれは、比較的低周波かつ広帯域な音源を浅海域で観測した場合に適用されるものであって、本研究で対象としている深海域でのマッコウクジラ鳴音の音源定位には適用が困難である。

また、海面及び海底の多重反射波が観測される水深一定の浅海域については、イルカの鳴音を対象とした文献[10]などの先行研究がある。具体的には、図 2 においてそれぞれ A, B, C と記した直達波、海面反射波（1 次海面反射波）及び海底－海面反射波（1 次海底反射波）が、観測点（初島沖ステーション）に到達する時間差を基に、音源定位、すなわち音源の深度と観測点から音源までの水平距離を推定するものである。しかしながら、本研究対象の深海域では、必ずしも多重反射波が観測されるわけではないので、水深一定と仮定するにしても、この手法がそのまま常に適用でき

るわけではない．ただし，今回初島沖システムの音響観測データの中から見出した人工音源は，多重反射波を伴っており，本手法が適用可能と考えられるので，推定した位置と既知の位置との対比により，手法の有効性を検討することとした．

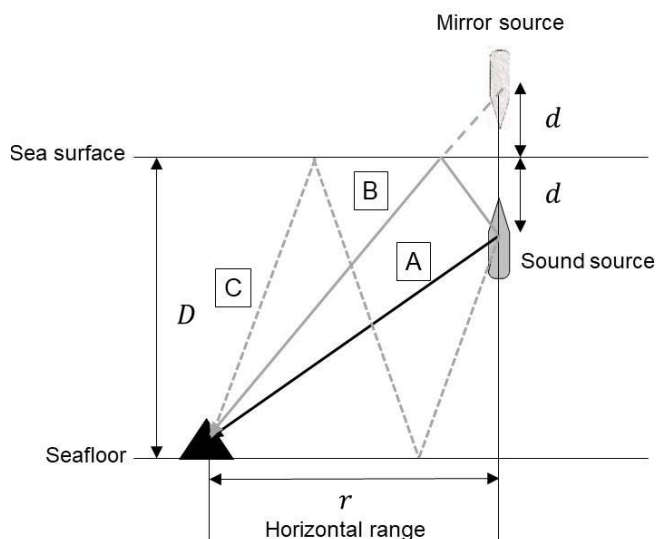


図2 直達波及び多重反射波の模式図
Fig. 2 Schematic of direct and multi-path signal

一方，文献[11]などに報告されているマッコウクジラの潜航行動を参照すると，マッコウクジラが深海に下降もしくは上昇する際には，およそ一定の位置を等速度で鉛直方向に移動すると仮定することが可能と考えられる．そこで，この仮定を適用した音源位置の推定手法についても人工音源に適用し，有効性を検討することとした．

4. 人工音源の位置推定と検証

今回初島沖システムの音響観測データの中から見出した海中の位置が既知の人工音源は，無人探査機 (Remotely Operated Vehicle, ROV) 「ドルフィン 3K」のレスポンドが発するパルス信号である．潜航中の支援母船による音響測位に用いるため，周波数 15.5 kHz のパルス信号を「ドルフィン 3K」の本体（ビークル）から 10 秒間隔で送出している．1999 年 6 月 10 日に実施された潜航時のパルス信号の一部が，デジタル化された初島沖システムの音響観測データに含まれており，これを今回音源位置推定の検討に用いた．

図3及び図4は，それぞれ「ドルフィン 3K」第425潜航及び第426潜航における上昇時に，観測された音響信号の波形について，振幅の絶対値の波形（エンベロープ）を作成し，直達波の到達時刻を基準とし，横軸を到達時間差としたエンベロープを時刻順に縦方向に並べたもの（ペーストアップ）である．なお，観測

波形にはビークルからの 15.5 kHz のパルス信号の他，テザーケーブル中間に取り付けられたトランスポンダや支援母船から発せられる近接周波数のパルス信号も含まれているため，各図にはこれらの信号も記録されている．図中の A, B, C で示した信号が，それぞれビークルからのパルス信号の直達波，1 次海面反射波，及び 1 次海底反射波である．図5には，これらの波形を観測した時間に対応する「ドルフィン 3K」の航跡を示す．図5における座標原点は初島沖ステーションとしてある．

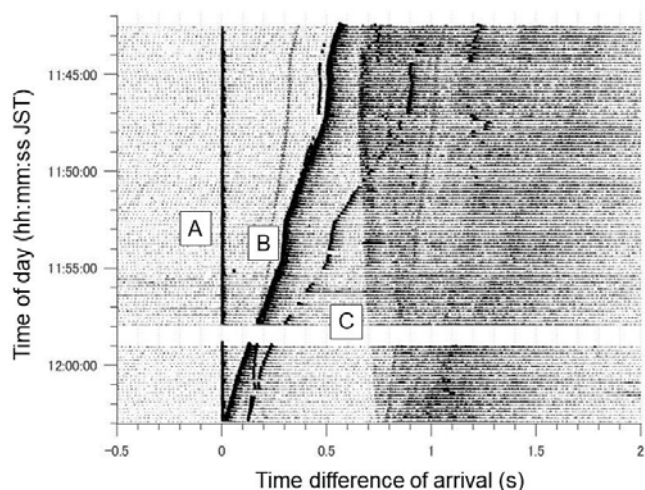


図3 「ドルフィン 3K」第425潜航時の観測波形
Fig. 3 Paste-up waveform of pulse signal from ROV “Dolphin 3K” in dive #425.

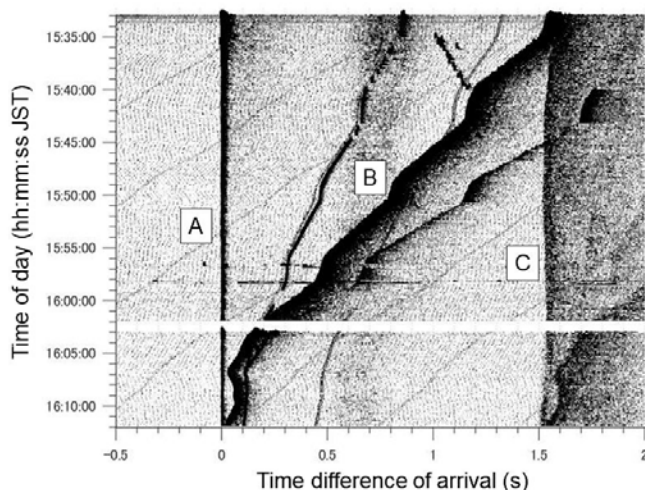


図4 「ドルフィン 3K」第426潜航時の観測波形
Fig. 3 Paste-up waveform of pulse signal from ROV “Dolphin 3K” in dive #426.

観測点を含む水深 (D) と海中の音速 (V) をいずれも一定 ($D=1175$ m, $V=1485.8$ m/s) と仮定し，音源深度と音源—観測点間の水平距離をそれぞれ d , r とする．なお，音速 (V) は当該潜航時にビークルに搭載した塩分

濃度・水温・深度計測プロファイルに基づいて求めた平均音速である．1次海面反射波と1次海底反射波の直達波からの到達時間差をそれぞれ ΔT_{1s} , ΔT_{1b} とすると，以下の2つの関係式が成り立つ．

$$\Delta T_{1s} = \frac{\sqrt{(D+d)^2 + r^2} - \sqrt{(D-d)^2 + r^2}}{V} \quad (1)$$

$$\Delta T_{1b} = \frac{\sqrt{(3D-d)^2 + r^2} - \sqrt{(D-d)^2 + r^2}}{V} \quad (2)$$

観測値 ΔT_{1s} , ΔT_{1b} に対応する未知数 d , r は，上記の連立方程式を解くことで求められる．図3及び図4の観測波形に対応する結果をそれぞれ図6及び図7に示す．両図とも上段が深度(d)，下段が水平距離(r)，白抜きが上記方程式から得られた結果，黒点が支援母船の音響測位に基づく実際の測位データである．図6では深度・水平距離ともに数百m以上の大きなずれがある．図7では深度はほぼ合っているが，水平距離には最大で500m程度の相違が見られる．これらの相違は，主に水深及び音速を一定と仮定したことからのずれに起因する．特に水深の影響は大きい．図1からわかるように，初島沖ステーションは斜面の麓に位置しており，水深の変化が大きい．図6に対応する第425潜航における離底時の深度は740mであり，一定と仮定した水深1175mとは大きく異なる．そこで，水深をこの中間の960mとすると，深度の相違は最大で100m程度となり，水平距離の相違も1000m程度低減される．図7に対応する第426潜航では，水深が深くなる東方向に移動しており，水深を深くすれば深度の相違は低減される．

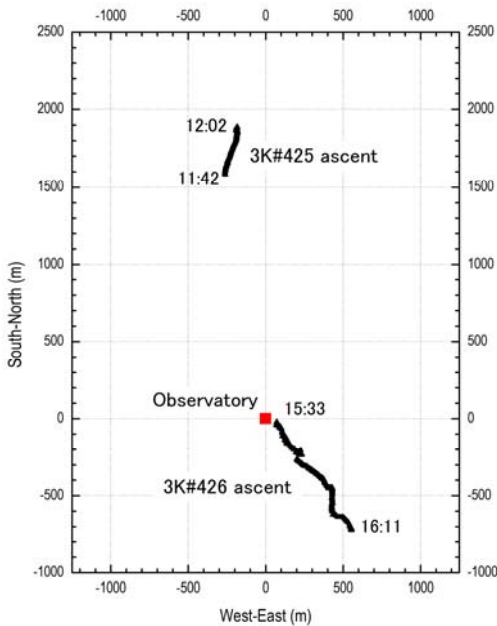


図5 「ドルフィン 3K」第425及び426潜航の航跡
Fig 5 Tracks of ROV “Dolphin 3K” dive #425 and #426.

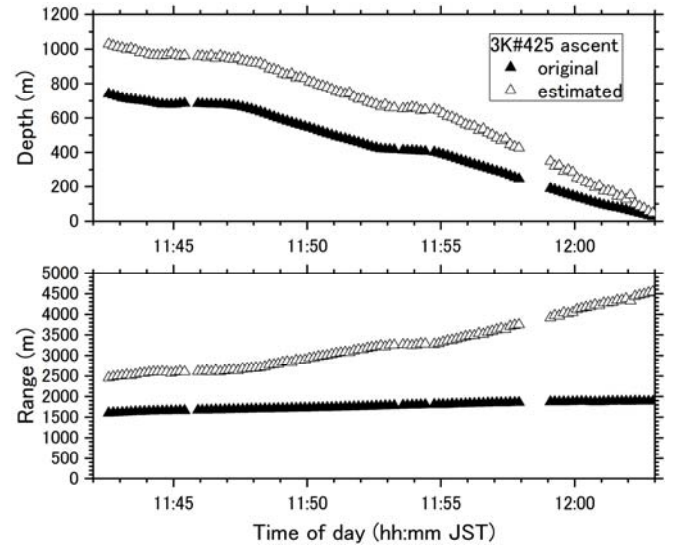


図6 第425潜航の水深及び水平距離の推定値と実測値

Fig. 6 Estimated and original depth and range of dive #425.

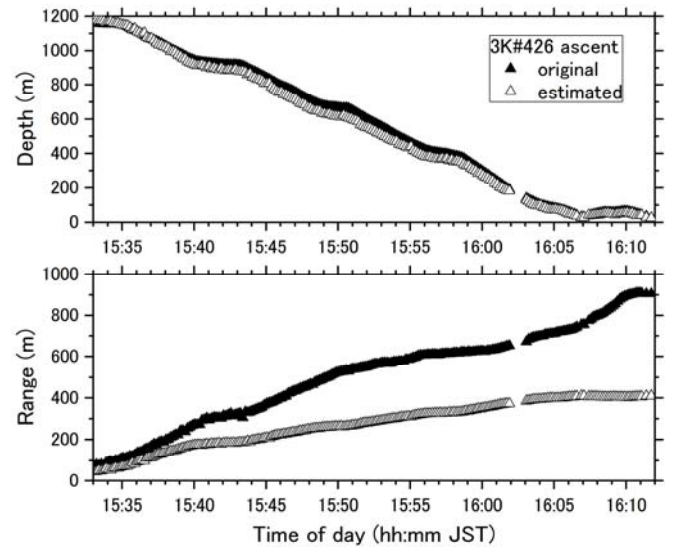


図7 第426潜航の水深及び水平距離の推定値と実測値

Fig. 7 Estimated and original depth and range of dive #426.

こうした相違の要因は，水深の影響が大きい1次海底反射波を用いたことにある．そこで別の手法として，上昇・下降に際しては，同一水平距離の地点を一定速度で移動すると仮定した音源位置推定手法を検討した．具体的には，まず式(1)を下記の式(3)に変形する．一定の上昇・下降速度を v とすれば，時刻 t における深度は，初期時刻の深度を d_0 として式(4)となる．そこで各観測値 ΔT_{1s} と対応時刻 t のデータセットに対して，式(3)と(4)の各右辺の差分の二乗和が最小となるような r , v ,

d_0 を求めて、 d を得るものである．最適解は matlab の関数 `fminsearch` を用いて求めた．

$$d = \frac{V\Delta T_{1s}}{2} \sqrt{\frac{r^2}{D^2 - \left(\frac{V\Delta T_{1s}}{2}\right)^2} + 1} \quad (3)$$

$$d = d_0 + vt \quad (4)$$

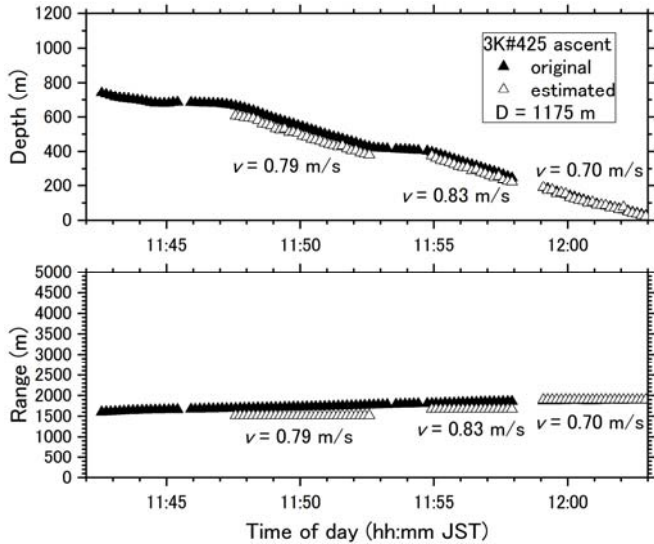


図 8 第 425 潜航の水深及び水平距離の推定値と実測値

Fig. 8 Estimated and original depth and range of dive #425.

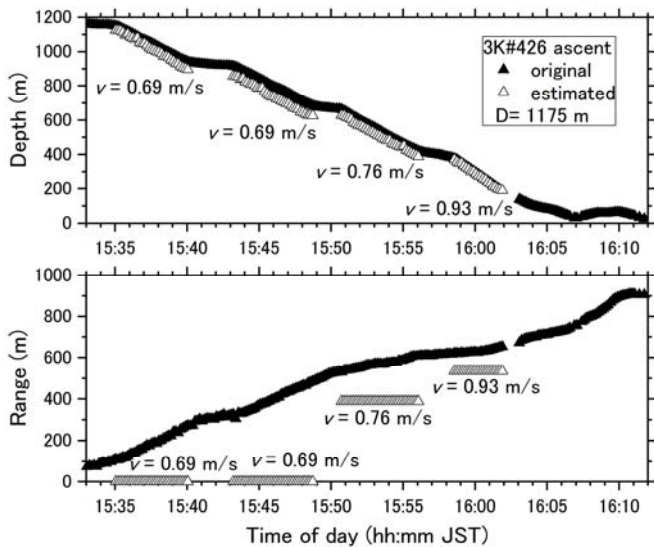


図 9 第 426 潜航の水深及び水平距離の推定値と実測値

Fig. 9 Estimated and original depth and range of dive #426.

しかしながら，無条件でこれら 4 つの未知数を求めようとすると， $r = 0$ が最適解となってしまう．そこで

拘束条件として速度 v を先見情報として仮定する．図 3 及び図 4 の 1 次海面反射波の到達時間差に対し，それぞれ v に実際の平均上昇速度を用いて本手法を適用した結果を図 8 及び図 9 に示す．水平距離が小さいほど水平距離を小さく見積もる傾向があるが，図 6 や図 7 に比べて大きく改善していることがわかる．

5. おわりに

初島沖ステーションによる水中音響観測データに記録されていた水中の位置が既知の人工音源である無人探査機「ドルフィン 3K」が発するパルス信号の観測波形を用い，単一ハイドロフォンによる音源の位置（深度及び水平距離）の推定方法とその有効性を検討した．1 次海底反射波を用いる方法は，水深変化が大きい当該海域では，水平距離が大きいほど推定位置の実際の位置との相違が大きくなる．今回提案した鉛直方向に一定速度で移動する仮定を用いた位置推定方法は，移動速度の先見情報が必要ではあるが，水深変化の影響が前者に比べて小さく，1 次海底反射が検出されないマッコウクジラ鳴音の位置推定にも適用できる可能性がある．

文 献

- [1] H. Momma, R. Iwase, K. Mitsuzawa, Y. Kaiho and Y. Fujiwara, “Preliminary results of a three-year continuous observation by a deep seafloor observatory in Sagami Bay, central Japan,” *Phys. Earth Planet. Inter.*, vol.108, pp.263-274, no.4, August 1998.
- [2] 岩瀬良一，満澤巨彦，平田賢治，海宝由佳，川口勝義，藤江剛，三ヶ田均，“相模湾初島沖深海底総合観測ステーションの更新一次世代リアルタイム観測の確立に向けて－,” *JAMSTEC 深海研究*, vol.18, pp.185-192, March 2001.
- [3] 岩瀬良一，菊池年晃，土屋利雄，水谷孝一，“相模湾初島沖深海底におけるハイドロフォン長期連続観測,” *信学技報*, US2005-34, pp.13-18, August 2005.
- [4] 岩瀬良一，直井純，菊池年晃，水谷孝一，“相模湾における低周波雑音計測,” *海洋音響学会誌*, US2005-34, pp.13-18, August 2005.
- [5] 岩瀬良一，“20 年超の長期観測に基づく相模湾初島沖のマッコウクジラ鳴音について,” *日本音響学会 2017 年春季研究発表会講演論文集*, pp.1115-1116, March 2017.
- [6] R. Iwase, “Sperm whale click sounds recorded on videotapes of a deep seafloor cabled observatory in Sagami Bay, Japan,” *Proc. Meetings on Acoustics*, vol.17, 070042, December 2012.
- [7] X. Li, Z. D. Deng, L. T. Rauchenstein, and Thomas J. Carlson, “Contributed Review: Source-localization algorithms and applications using time of arrival and time difference of arrival measurements,” *Review of Scientific Instruments*, vol.87, 041502, April 2016.
- [8] W. Kuperman, G. D’Spain, and K. Heaney, “Long range source localization from single hydrophone spectrograms,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.109, no.5,

pp.1935-1943, May 2001.

- [9] J. Bonnel and A. Thode, "Range and depth estimation of bowhead whale calls in the Arctic using a single hydrophone," Proc. 2014 IEEE Sensor Systems for a Changing Ocean, doi:10.1109/SSCO.2014.7000373, Brest, France, October 2014.
- [10] R. Aubauer, M. O. Lammers, and W. W. L. Au, "One-hydrophone method of estimating distance and depth of phonating dolphins in shallow water," J. Acoust. Soc. Am., vol.107, no.5, pp.2744-2749, May 2000.
- [11] S. L. Watwood, P. J. O. Miller, M. Johnson, P. T. Madsen, and P. L. Tyack, "Deep-diving foraging behaviour of sperm whales (*Physeter macrocephalus*)," J. Animal Ecology, vol.75, pp.814-825, 2006.